

**А. И. Морозова<sup>\*</sup>, Я. А. Ольховикова**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ «БелГУ»), г. Белгород

<sup>\*</sup> morozova\_ai@bsu.edu.ru,

Научный руководитель – проф., д-р физ.-мат. наук А. Н. Беляков

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РКУП НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО CU–CR–ZR СПЛАВА

Изучены механические свойства низколегированной бронзы Cu–0,1%Cr–0,06%Zr (масс.%), подвергнутой термической обработке на получение пересыщенного твердого раствора при температуре 920 °С 1 ч с последующей закалкой в воду и равноканальному угловому прессованию по маршруту В<sub>С</sub> при температурах 20 °С и 400 °С до различных степеней деформации  $\epsilon = 1\text{--}4$ . Исследовано влияние температуры деформации на деформационное поведение, прочностные свойства, пластичность и коэффициент деформационного упрочнения.

*Ключевые слова:* CU–CR–ZR сплав, механические свойства, микроструктура, РКУП, коэффициент деформационного упрочнения.

**A. I. Morozova, Y. A. Olkhovikova**

## EFFECT OF ECAP TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF A LOW ALLOYED CU–CR–ZR ALLOY

The mechanical properties of the a alloyed Cu-0.1%Cr-0.06%Zr (wt.%) alloy subjected to a solution treatment at a temperature of 920 °C 1 h followed by water quenching and the subsequent equal channel angular pressing (ECAP) via route В<sub>С</sub> at temperatures of 20 °C and 400 °C to strains of  $\epsilon = 1\text{--}4$  were examined. Effect of the deformation temperature on deformation behavior, strength, plasticity and strain-hardening rate in the low alloyed CU–CR–ZR alloy was investigated.

*Keywords:* CU–CR–ZR alloy, mechanical properties, microstructure, ECAP, strain-hardening rate.

Сплавы системы CU–CR–ZR являются перспективными материалами для электротехнической промышленности благодаря высокой электропроводности [1–2]. Кроме того, в данных материалах удастся достичь высокие прочностные показатели за счет дисперсионного упрочнения и измельчения структуры методами интенсивной пластической деформации, в частности, равноканальным угловым прессованием (РКУП) [2]. Важным параметром данного процесса является температура прессования, изменение которой влияет на формирующуюся

структуру, и, следовательно, на механические свойства сплава. Поэтому целью данной работы было изучение влияния температуры деформации на механические свойства, деформационное поведение и деформационное упрочнение низколегированной CU–CR–ZR бронзы.

В качестве материала исследования был выбран медный сплав CU–CR–ZR (Cu–0,1%Cr–0,06%Zr, масс. %), который был подвергнут РКУП по маршруту В<sub>С</sub> при температурах 20 °С и 400 °С до степеней деформации  $\epsilon \sim 1$ ; 2; 4. Перед деформацией сплав был обработан на получение пересыщенного твердого раствора при температуре 920 °С в течении 1 ч с последующей закалкой в воду. Для анализа механических свойств были проведены испытания на одноосное растяжение на машине Instron 5882 при комнатной температуре с начальной скоростью деформации  $2 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

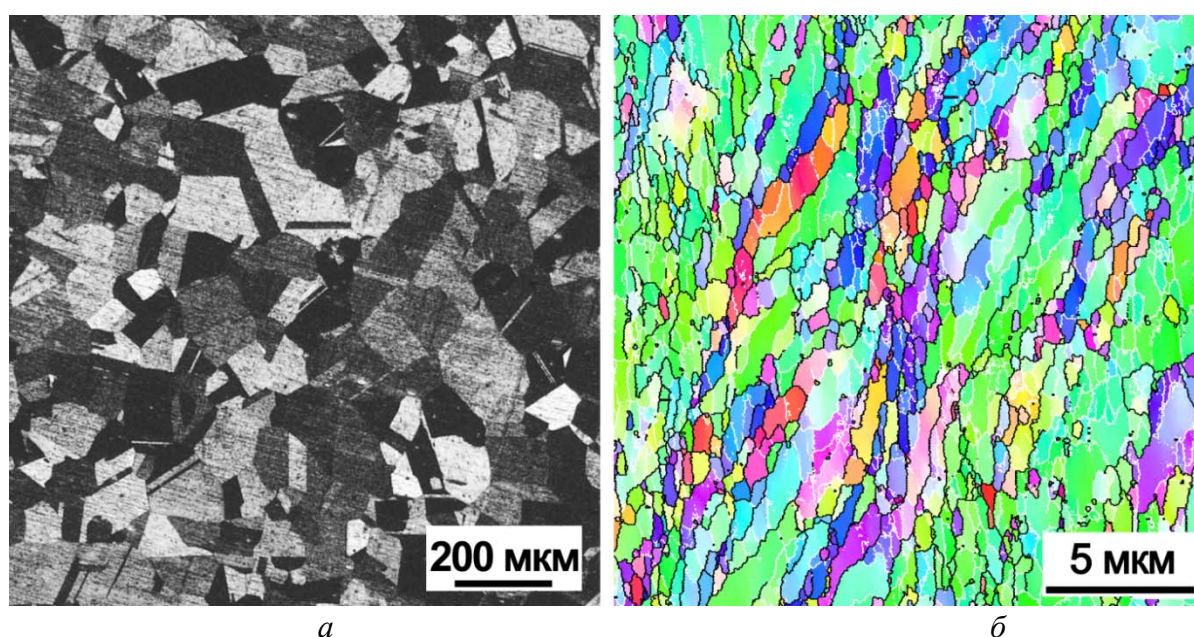


Рис. 1. Микроструктура сплава Cu–0,1%Cr–0,06%Zr после закалки (а) и после РКУП при температуре 400 °С до истинной деформации  $\epsilon = 12$  (б)

Микроструктура низколегированной CU–CR–ZR бронзы в исходном закаленном состоянии и после РКУП при температуре 400 °С до истинной степени деформации  $\epsilon = 12$  представлена на рис. 1. Исходное закаленное состояние представлено крупными зернами средним размером 100 мкм. Зерна разделены двойниками отжига. Плотность дислокаций в исходном состоянии составляет  $3 \times 10^{12} \text{ м}^{-2}$ . Интенсивная пластическая деформация сопровождается значительными изменениями в структуре. Уже после первого прохода РКУП увеличивается плотность дислокаций, формируются малоугловые границы дислокационного происхождения, исходные зерна вытягиваются в направлении течения металла. Увеличение степени деформации приводит к росту разориентировок деформационно-индуцированных малоугловых границ с их последующей трансформацией

в большеугловые. Данный процесс сопровождается формированием деформационных полос – длинных параллельных большеугловых границ, пространство между которыми разбито поперечными малоугловыми границами. Постепенно формируются новые зерна, размером менее 1 мкм, при этом доля субмикрокристаллической структуры возрастает с увеличением степени деформации. Так, после степени деформации  $\epsilon = 4$  доля субмикрокристаллической структуры составляет 30–40 %. Как видно из рис. 2, б, деформация методом РКУП приводит к формированию бимодальной структуры – наряду с областями с ультрамелкими зернами существуют обширные области, в которых преобладают малоугловые границы.

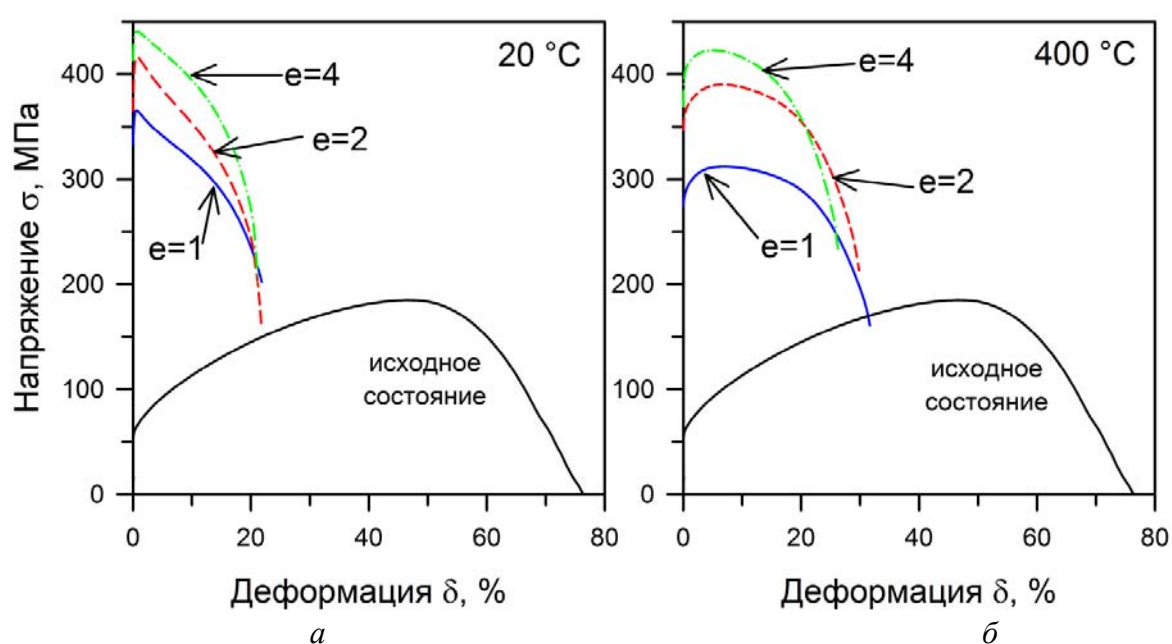


Рис. 2. Кривые напряжение–деформация для сплава Cu–0,1%Cr–0,06%Zr после РКУП при температуре 20 °C (а) и 400 °C (б) до различных степеней деформации  $\epsilon = 1\text{--}4$

Микроструктурные изменения влияют на прочностных свойствах CU–CR–ZR сплава. На рис. 2 приведены кривые напряжение-деформация для Cu–0,1%Cr–0,06%Zr сплава, подвергнутого равноканальному угловому прессованию при различных температурах. В исходном состоянии (после обработки на твердый раствор) кривая течения характеризуется продолжительной стадией деформационного упрочнения. Деформационное поведение материала после РКУП сильно зависит от температуры деформации, тогда как степень деформации не оказывает сильного влияния на общий вид диаграммы деформации. В сплаве, подверженном РКУП при температуре 20 °C, максимальное напряжение достигается уже после относительного малого удлинения 0,5–1 % вне зависимости от степени деформации. Затем происходит резкое падение напряжения течения. Данный факт свидетельствует о быстрой локализации

деформации и образовании шейки практически сразу после окончания упругой деформации. При дальнейшей деформации вклад в прирост напряжений течения от деформационного упрочнения не столь велик, как эффект уменьшения площади сечения образца, поэтому на диаграмме напряжение-деформация наблюдается спад. Деформация при повышенных температурах (400 °С) характеризуется относительно продолжительной стадией деформационного упрочнения (~ 5 %). С увеличением степени деформации стадия деформационного упрочнения сокращается.

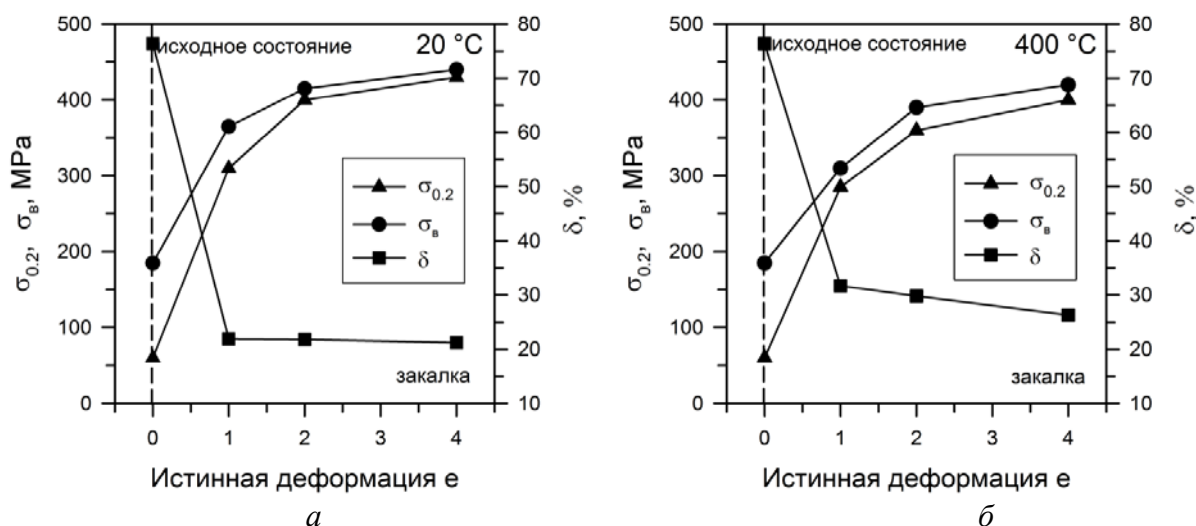


Рис. 3. Изменение предела текучести  $\sigma_{0.2}$ , предела прочности  $\sigma_B$  и относительного удлинения  $\delta$  сплава Cu-0,1%Cr-0,06%Zr в зависимости от степени деформации РКУП при температурах 20 °С (а) и 400 °С (б)

Изменение предела текучести ( $\sigma_{0.2}$ ), предела прочности ( $\sigma_B$ ) и относительного удлинения ( $\delta$ ) после РКУП в зависимости от температуры обработки представлено на рисунке 3. РКУП приводит к резкому росту прочностных свойств уже после 1-го прохода. Отметим, что прочностные свойства выше в сплаве, деформированном при температуре 20 °С, при этом с увеличением степени деформации этот эффект снижается. Предел текучести в закаленном сплаве после 4х проходов РКУП при температуре 20 °С составляет 430 МПа, а при температуре 400 °С – 400 МПа. Упрочнение медного сплава сопровождается падением пластичности. При этом снижение пластичности ярче выражено в сплаве, подвергнутом РКУП при комнатной температуре. Деформация при температуре 20 °С приводит к резкому падению относительного удлинения сразу после первого прохода до 22 %. С увеличением степени деформации пластичность практически не изменяется, и после 4х проходов РКУП относительное удлинение составляет 21 %. Напротив, деформация при повышенной температуре сопровождается постепенным снижением значений относительного удлинения с ростом степени деформации, так, после 1-го прохода РКУП пластичность составляет 32 %, а после 4-х – 26 %.

Таким образом, интенсивная пластическая деформация методом РКУП приводит к существенным изменениям механических свойств низколегированной  $\text{Cu-Cr-Zr}$  бронзы. Изменение температуры деформации влияет на деформационное поведение сплава и уровень механических свойств. Снижение температуры деформации приводит к увеличению прочностных характеристик и снижению пластических. Максимальная прочность была достигнута в сплаве, подвергнутом РКУП при комнатной температуре до истинной степени деформации  $\epsilon = 2$ , предел текучести после данной обработки составил 430 МПа при относительном удлинении 21 %.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки РФ (грант № 14.575.21.0135, идентификационный номер RFMEFI517X0135) с использованием оборудования ЦКП «Технологии и Материалы» НИУ «БелГУ».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Correia J. B. Strengthening in rapidly solidified age hardened Cu- Cr and Cu- Cr- Zr alloys / J. B. Correia, H. A. Davies, C.M. Sellars. ActaMaterialia. 1997. V. 45. № 1. P. 177–190.
2. Morozova A. Grain refinement and strengthening of a Cu–0.1 Cr–0.06 Zr alloy subjected to equal channel angular pressing / A. Morozova, R. Kaibyshev // Philosophical Magazine. 2017. V. 97. № 24. P. 2053–2076.